

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENRSTVÍ

Katedra materiálového inženýrství



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Studium mikrostruktury slitiny EN AW 5083 po plastometrické simulaci válcováním
za tepla**

**Microstructure analysis of EN AW 5083 alloy after plastometric simulation of hot
rolling**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálového inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Miroslava Lišková**
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911R030 Technické materiály
Téma: Studium mikrostruktury slitiny EN AW-5083 po plastometrické simulaci
válcování za tepla
Microstructure analysis of EN AW-5083 alloy after plastometric
simulation of hot rolling

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretická část.
 - 2.1. Hliníkové slitiny ke tváření.
 - 2.2. Hliníkové slitiny na bázi Al-Mg.
3. Experimentální část.

Analýza mikrostruktury slitiny EN AW-5083 po plastometrické simulaci válcování za tepla metodou světelné mikroskopie.

4. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] *Encyklopedie hliníku*. MICHNA, Š. et al. Prešov: Adin, s.r.o., 2005. ISBN 80-89041-88-4.
[2] CALLISTER, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 7. vyd. New York: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 0-471-73696-1.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Dr. Ing. Jaroslav Sojka**

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 20.05.2016

prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
 - Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
 - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.
- BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání BP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část BP bude zpracována v rozsahu min. 15 stran a celkový rozsah BP bude min. 25 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku.

Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatků ve způsobu vyjadřování, nedostatků gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

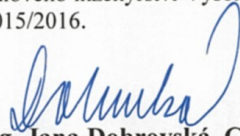
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 9.5.2016


.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

ABSTRAKT

Tématem mé bakalářské práce je studium mikrostruktury slitiny EN AW 5083 po plastometrické simulaci válcováním za tepla. První část mé bakalářské práce popisuje hliník a slitiny hliníku, jejich mikrostrukturu, chemické, mechanické vlastnosti. Dále jsou v první části podrobněji popsány slitiny řady 5000, zkoumaná slitina EN AW 5083 a uzdravovací procesy u hliníkových slitin. Závěr první části je věnován metalografickým metodám.

Druhá část je věnována experimentu, kde je analyzována mikrostruktura slitiny EN AW 5083 po plastometrické simulaci válcováním za tepla metodou světelné mikroskopie. Výsledky a vyhodnocení tohoto experimentu jsou prezentovány v závěru této bakalářské práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hliník; hliníková slitina; slitina EN AW 5083; zrno

ABSTRACT

The topic of my bachelor's thesis is an analysis of EN AW 5083's microstructure after plastometric simulation by hot rolling. First part of my thesis describes aluminium and its alloys, their microstructure, chemical and mechanical properties. Moreover there are further descriptions of 5000 series alloys, examined EN AW 5083 alloy and regeneration processes of carbon based alloys. The conclusion of the first part deals with metallographic methods.

Second part is focused on light microscopy analysis of the EN AW 5083 alloy's microstructure after plastometric simulation by hot rolling. The results and evaluation of this experiment are provided at the end of my thesis.

KEYWORDS

Aluminium; aluminium alloy; alloy EN AW 5083; grain

Děkuji vedoucímu práce prof. Dr. Ing. Jaroslavu Sojkovi za odborný dohled, pomoc a připomínky, které mi pomohly k dokončení mé bakalářské práce. Zároveň za ochotné a trpělivé jednání, které mě vždy povzbudilo k další práci.

Dále bych chtěla poděkovat členům technologického, vývojového oddělení a metalografické laboratoře ve společnosti Alinvest Břidličná a.s., kteří mi byli velmi nápomocni při předávání potřebných informací.

OBSAH:

1. Úvod	9
2. Teoretická část	10
2.1 Hliník	10
2.2 Krystalizace hliníku a jeho slitin	11
2.3 Slitiny hliníku	15
2.3.1 Slitiny hliníku pro tváření	17
2.4 Hliníkové slitiny řady 5000 na bázi Al – Mg	18
2.4.1 Slitina EN AW 5083	20
2.5 Uzdravovací procesy	21
2.5.1 Dynamické zotavení	21
2.5.2 Dynamická rekrystalizace	21
2.5.3 Postdynamické uzdravování	23
3. Experimentální část	24
3.1 Cíl práce	24
3.2 Vlastní experiment	24
4. Závěr	35
Seznam literatury	36
Seznam tabulek	38
Seznam obrázků	39

1. ÚVOD

K vypracování této práce jsem se rozhodla na základě mé pracovní náplně, kterou je prodej hliníkových plechů a pásů v různých slitinách do automobilového průmyslu. V posledních letech se automobilový průmysl zaměřuje na odlehčení konstrukce automobilů, a to hlavně z důvodů snížení spotřeby paliva a tvorby zplodin. U emisních limitů jsou požadovány stále nižší hodnoty koncentrace škodlivin, které zatěžují životní prostředí, a to zejména ve státech, které jsou členy Evropské unie. Nedodržení emisních limitů je často sankcionováno a produkty nesmí být případně vůbec uvedeny na trh.

Aby došlo ke snížení tzv. uhlíkové stopy, zaměřili se výrobci automobilů na snížení hmotnosti automobilu. Znamená to v praxi zmenšit jednotlivé díly, zmenšit tloušťku a provést změny v použitých materiálech směrem k těm s nižší měrnou hmotností. Většina dílů v automobilech je historicky z oceli a jejích slitin. Vzhledem k tomu, že hliník je cca 3 krát lehčí než ocel, ubírají se konstruktéři a vývojáři směrem využití jeho slitin a slitin hořčíku.

Tato práce je součástí projektu zkoumání slitiny EN AW 5083 při tváření za tepla „Optimalizace plasticity legované slitiny AlMg4,5Mn0,7“, který se uskutečnil na základě zadání společnosti Al Invest Břidličná a.s. na vývoj slitin pro automobilový průmysl. Cílem této práce je dokumentace průběhu uzdravovacích procesů u hliníkové slitiny EN AW 5083 při fyzikální simulaci prvních 10 – ti průchodů během válcování bramy – bloku za tepla.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Hliník

Hliník je po kyslíku a křemíku třetím nejrozšířenějším prvkem na Zemi a nejvíce procentuálně zastoupený prvek v zemské kůře. Patří mezi kovy, které díky své hustotě $2,79 \text{ kg.m}^{-3}$ a malému elektrickému odporu mají široké využití. Je snadno recyklovatelný a dobře svařitelný v ochranné atmosféře. Jeho výroba ve větším měřítku začala v roce 1859. Výroba hliníku byla zpočátku velmi drahá, ale se zvýšením výroby a postupně klesající cenou se rozšířilo jeho použití do různých oblastí. Vzhledem ke své nízké hustotě, jež přináší snížení tzv. prázdné hmotnosti v dopravě a dobrým vlastnostem při nízkých teplotách, se používá v leteckém a automobilovém průmyslu. Dále se používá v lodní a železniční dopravě, strojírenství a stavebnictví. [1]

Hliník se v přírodě jako čistý kov nevyskytuje a tvoří velké množství sloučenin. Je to trojmocný kov s atomovým číslem 13 a patří do skupiny III.A. v Mendělejevově periodické tabulce chemických prvků. V přírodě se vyskytuje pouze jeden izotop. Je to kov bělavě šedé barvy, má kubickou plošně centrovanou mřížku K12, parametr mřížky $a = 0,4041 \text{ }\mu\text{m}$. Na základě této mřížky má velmi dobré plastické vlastnosti za tepla i studena. Hustota (při $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) je rovna 2700 kg.m^{-3} . Součinitel tepelné roztažnosti v rozmezí teplot 20 až $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ je $23,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, hodnota součinitele tepelné vodivosti je $217,6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a elektrický odpor je $\rho = 2,63 \text{ }\mu\Omega.\text{cm}$. [1, 3, 5]

Elektrická vodivost hliníku činí 65 % elektrické vodivosti mědi. Teplota tání je $660,32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplota varu $2519 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Atomová hmotnost je 26,97. Pevnostní vlastnosti hliníku jsou nízké, což velmi omezuje jeho použití. Pevnost v tahu je nízká, v měkkém stavu je přibližně $R_m = 70 \text{ MPa}$. [1, 3, 5]

V čistém stavu je velmi reaktivní a na vzduchu se na jeho povrchu vytvoří tenká vrstva oxidu Al_2O_3 , která kov chrání před jeho další oxidací. Tato ochranná vrstva oxidu může být zesílena eloxováním. Hliník má dobrou korozní odolnost v kyselině chlorovodíkové, sírové a dusičné, naopak v zásadách má velmi nízkou korozní odolnost. Z chemického hlediska je hliník kov neušlechtilý. [1, 3, 4]

Nejvýznamnější rudou hliníku je bauxit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – dihydrát oxidu hlinitého), s příměsí silikátů, jílu, hydroxidů hliníku, usazenin a hydroxidů železa. Bauxit se používá

jako výchozí surovina pro výrobu hliníku. Jedna tuna hliníku odpovídá výchozím 4 až 6 tunám bauxitu. V těžbě bauxitu dominují zejména Austrálie, Guinea, Jamajka, Brazílie a Čína. Dalšími sloučeninami jsou například: kryolit ($\text{Na}_3(\text{AlF}_6)$) a korund (Al_2O_3). Kryolit je používán jako tavidlo pro snížení teploty tání bauxitu. Výroba hliníku je rozdělena na dva nezávislé procesy. Prvním procesem je výroba oxidu hlinitého z bauxitu, druhým procesem je pak elektrolytická výroba hliníku. [1, 3, 5]

V posledních desetiletích dochází k nárůstu spotřeby hliníku, tím se samozřejmě zvyšují i nároky na výrobu hliníku. Vhodným pro hojné používání se hliník stává díky svým vlastnostem ve slitinách - vysoká elektrická vodivost, odolnost proti korozi, právě díky vzniku oxidační vrstvy Al_2O_3 , dobrá schopnost tváření za studena i za tepla. Aplikace fyzikální metalurgie u hliníku a jeho slitin spočívá ve znalosti a využití vlivu chemického složení, tváření a tepelného zpracování na chemické, fyzikální a technologické vlastnosti. [1]

Čistý hliník má nízké pevnostní vlastnosti, což omezuje jeho použití. Aby bylo dosaženo zlepšení pevnostních, chemických a technologických vlastností, je čistý hliník legován tzv. legovacími prvky. Například pevnostní vlastnosti můžeme zlepšit pomocí hořčíku. Správná volba legujících prvků je důležitá a rozhodující pro další zpracování a použití výsledného výrobku. [1, 3]

2.2 Krystalizace hliníku a jeho slitin

Krystalizaci kovu rozdělujeme na primární a sekundární. Primární krystalizace je proces, který probíhá u hliníku při přechodu z kapalného do tuhého stavu. Sekundární krystalizace navazuje na krystalizaci primární a vznikají při ní nové fáze v tuhé, krystalické látce. Proces krystalizace není stejnoměrný v celém objemu taveniny. Tento proces začíná na tzv. krystalizačních zárodcích, kdy každé zrno vyrůstá z jednoho zárodku a ke konci tuhnutí do sebe narazí. [1, 5]

„U hliníku je obvykle z hlediska kvalitativního snahou docílit izotropické, globulitické lité struktury. Zrna mají v takové struktuře ve všech směrech stejný průměr a nemají žádnou přednostní orientaci (texturu).“ [1]

Velikost litého zrna je důležitým kvalitativním znakem. Jeho velikost ovlivňují tyto faktory: rychlost lití, teplota taveniny, rychlost ochlazování taveniny a prostředky přidané pro

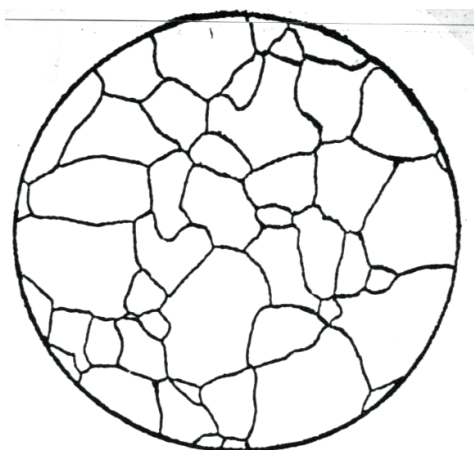
zjemnění zrna. Zrno lze zjemnit například titanem nebo vanadem. Plošná hustota zrn je obvykle 20 - 30 zrn na mm^2 . [1]

Pokud je tavenina rychleji ochlazována, mohou vznikat v některých směrech eliptická, peříčkovitá nebo sloupcovitá zrna. Odchylky od globulitické struktury zrna způsobují nekvalitu, například: zvýšená poréznost, zvýšená chemická nehomogenita. [1]

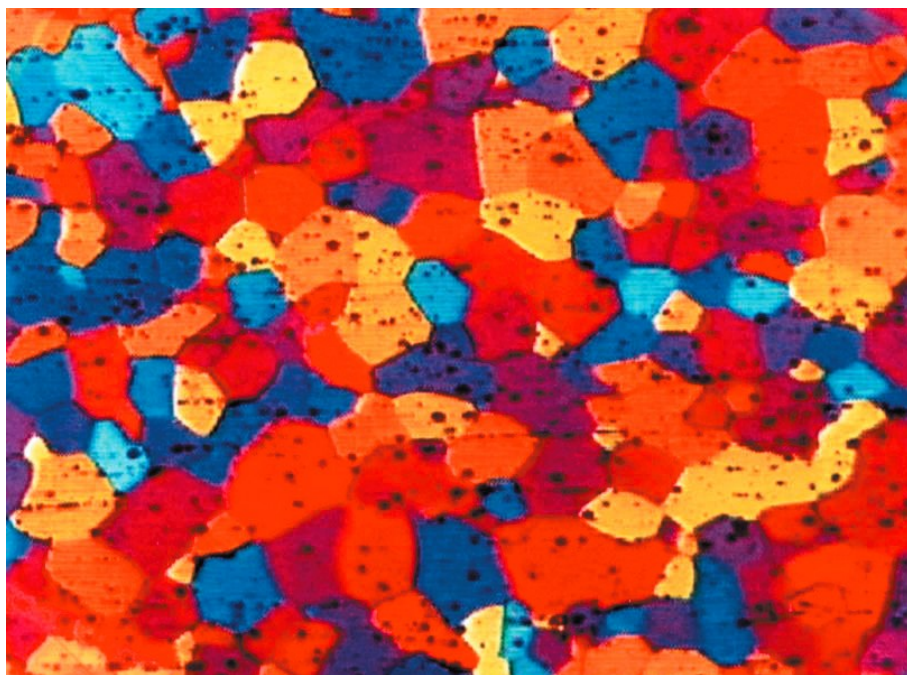
Při dalším zpracování materiálu, jako je tažení nebo lisování, dochází k otáčení zrn ve směru deformace, vzniká vláknitá struktura, kterou nazýváme deformační strukturou. V průběhu deformací, které jsou způsobené dalším tvářením, dochází ke zpevnění materiálu - roste mez pevnosti, mez kluzu, tvrdost a rychlost šíření únavových trhlin. Zároveň se snižuje jeho plasticita a tažnost. [1, 5, 9]

Z důvodu nestability materiálu, způsobenou předchozím zpracováním, se přistupuje k žitání. Při žitání probíhají 2 etapy změn, zotavení materiálu a rekrytalizace. [1, 8]

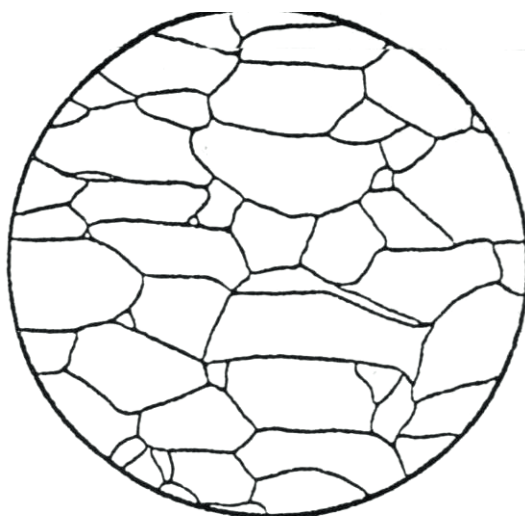
Jednou z posuzovaných charakteristik materiálu je velikost zrn. U hodnocení velikosti zrn bývají používána různá kritéria - velikost, počet zrn na jednotku plochy, tvar zrna. Zrna je možné rozdělit do tří kategorií podle jejich tvaru. První kategorií jsou zrna globulitická *Obr. 2.1* a *Obr. 2.2*, do druhé kategorie zrn spadají zrna nerovnoosá mírně protáhlá viz *Obr. 2.3* a *Obr. 2.4*, do poslední třetí kategorie řadíme zrna nerovnoosá silně protáhlá, která jsou znázorněna na *Obr. 2.5* a *Obr. 2.6*. [1, 5, 9]



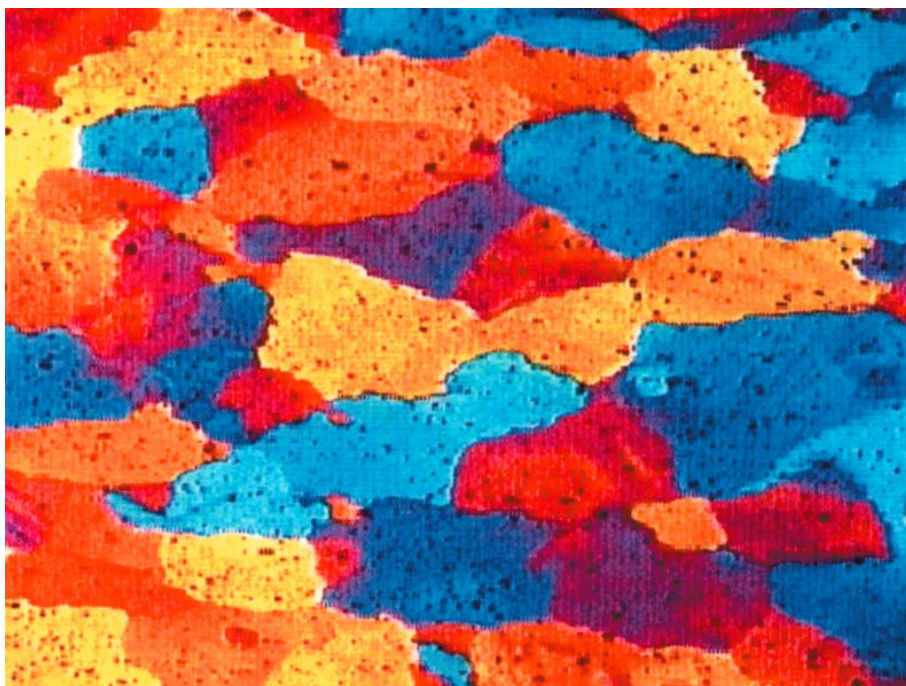
Obr. 2.1 Zrno rovnoosé nebo globulitické, poměr na sebe kolmých směrů 1:1 [1]



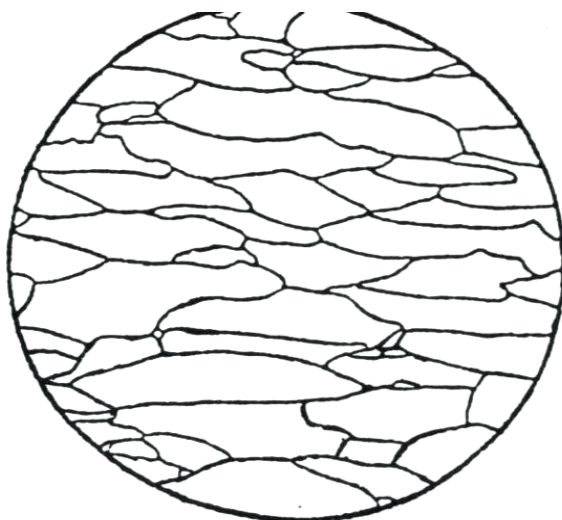
Obr. 2.2 Rovnoosé, globulitické zrno u slitiny AlMg5 - zvětšeno 100x [1]



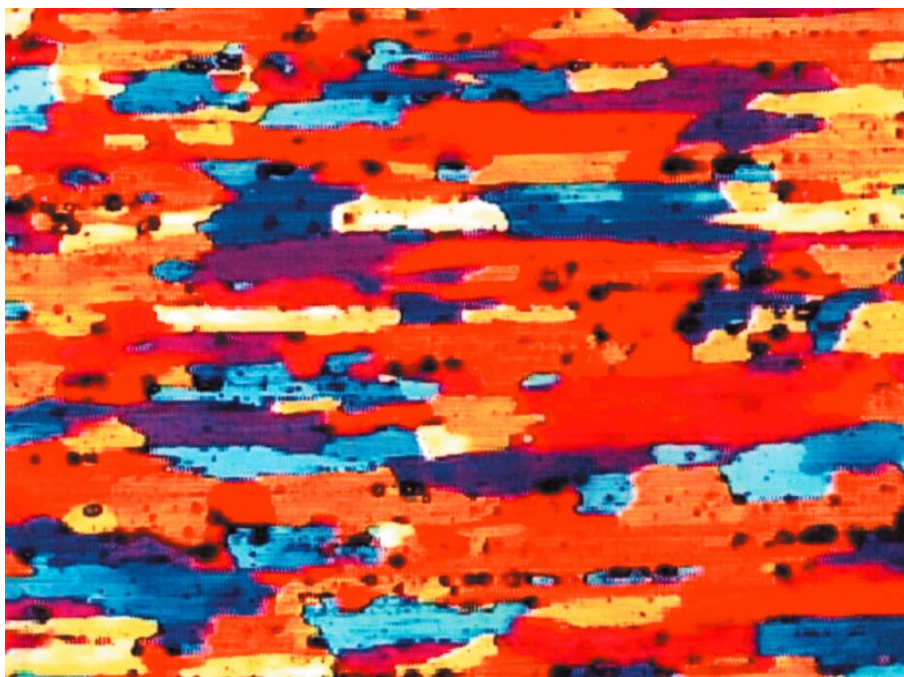
Obr. 2.3 Zrno nerovnoosé, mírně protáhlé, poměr na sebe kolmých směrů 2.1 [1]



Obr. 2.4 Nerovnoosé mírně protáhlé zrno u slitiny AlMgSi0,5 - zvětšeno 100x [1]



Obr. 2.5 Zrno nerovnoosé, silně protáhlé, poměr na sebe kolmých směrů 4:1 [1]



Obr. 2.6 Nerovnoosé mírně protáhlé zrno u slitiny AlZn6MgCu1,5 zvětšeno - 100x [1]

2.3 Slitiny hliníku

Značení slitin hliníku se řídí normou ČSN EN 1706. Dle této normy se značí písmeny a čtyřmístnými čísly. Například EN AW 5083, EN – značí evropskou normu, A – značí hliník, W – značí tvářené výroby (v této pozici může být písmeno C, které značí odlitky) první číslo značí hlavní legující prvek. [10]

Slitiny hliníku lze dělit podle různých kritérií - je definováno 8 skupin hliníku a jsou značeny číselnou řadou 1000 až 8000. [1, 3, 10]

Označení skupiny 1000 se používá pro nelegovaný hliník obsahující pouze přirozeně doprovodné prvky. Minimální obsah hliníku je 99,00 %. Používá se v energetice, chemickém a elektrochemickém průmyslu, a to hlavně díky své vysoké tepelné a elektrické vodivosti. [1, 3]

Měď je hlavním legujícím prvkem u skupiny slitin označené jako slitiny 2000. Tyto slitiny bývají tepelně zpracovatelné. Jsou náchylné ke korozi, zejména k interkrystalické korozi. [1]

Slitiny řady 3000 jsou legované manganem. Nejsou tepelně zpracovatelné. Tyto slitiny jsou hodně používány na výrobu tepelných výměníků a dále topných těles a chladičů v automobilovém průmyslu. [1, 5]

U řady slitin 4000 je hlavním legujícím prvkem křemík. Tyto slitiny vykazují dobrou odolnost vůči korozi. Pokud mají vysoký obsah křemíku, používají se jako svařecí dráty. [1, 3, 5]

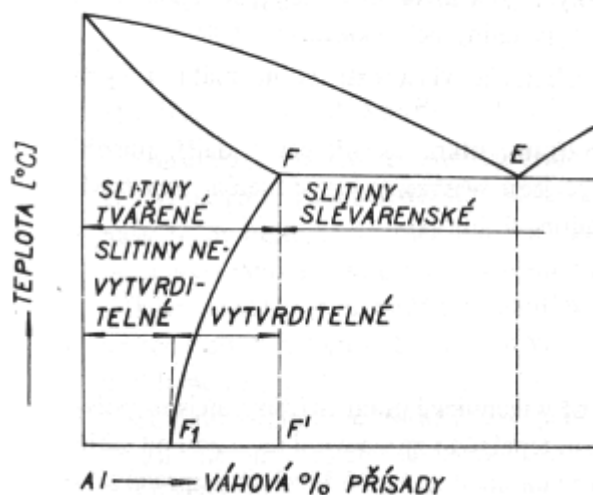
Dobrá svařitelnost a obrobitelnost jsou specifické vlastnosti pro slitiny řady 5000, tato řada je legována hlavně hořčíkem. [1, 3]

Pro hliníkovou řadu 6000 je hlavním legujícím prvkem křemík a hořčík. Důležitou složkou je intermetalická fáze Mg_2Si . Díky této intermetalické fázi jsou samokalitelné. [1, 3]

Slitiny řady 7000, se řadí mezi vysokopevnostní slitiny, které jako hlavní legovací prvek obsahují zinek. [1, 3]

U slitin z řady 8000 se k legování používají jiné prvky, které nejsou použity jako hlavní legovací prvek u slitin řady 2000 – 7000 (např. železo). [1, 3]

Jedním z dalších kritérií pro rozdělení hliníkových slitin může být jejich způsob výroby a dále schopnost zvýšení tvrdosti a pevnosti tepelným zpracováním, vytvrzováním. Tato schopnost souvisí s chemickým složením slitin, tedy s jejich polohou v rovnovážném diagramu odpovídající soustavy. [1, 5]



Obr. 2.7 Schematické rozdělení Al slitin slévárenských a Al slitin pro tváření[1]

Dle výše uvedeného diagramu dělíme slitiny hliníku na slitiny hliníku slévárenské a slitiny hliníku pro tváření, Obr. 2.7. Rozdíl mezi těmito dvěma skupinami slitin je v hranici nasycení tuhého roztoku při eutektické teplotě. Slitiny, které se nachází za hranicí nasycení a které mají ve svém složení eutektikum, jsou slévárenské slitiny. [1, 5]

2.3.1 Slitiny hliníku pro tváření

Slitiny pro tváření jsou používány jako základní konstrukční materiály např. pro výrobu letadel, železničních vozidel a automobilů, jejich další využití se nachází v dalších strojírenských odvětvích. Většina slitin je málo legována a obsah legujících prvků v tuhém roztoku zpravidla nepřekročí 10 %. [1, 5]

Slitiny pro tváření mají ještě dvě podskupiny dělení a to hliníkové slitiny nevytvrditelné a vytvrditelné precipitačním zpevněním – viz *Tab. 2.1.* [5]

Mezi slitiny vytvrditelné precipitačním zpevněním patří slitiny, které budou uvedeny níže v textu. Mezi prvního zástupce patří slitiny Al-Mg-Si. Tyto slitiny jsou dobře tvářitelné a svařitelné, mají dobrou korozní odolnost a schopnost povrchových úprav, používají se zejména v automobilovém průmyslu, letectví a stavebnictví. Další vytvrditelnou slitinou je slitina Al-Cu-Mg, tato skupina slitin je mimo jiné nazývána jako duraly. Duraly dosahují po vytvrzení vysoké pevnosti, mezi jejich přednosti patří přirozené stárnutí a jejich nevýhodou je malá odolnost proti korozi. Slitiny Al-Zn-Mg-Cu jsou nejpevnějšími slitinami hliníku, mají velmi dobré mechanické vlastnosti i ve svarech. Jejich nedostatkem je sklon ke korozi pod napětím, nižší lomová houževnatost a vyšší vrubová citlivost než u duralů. [1, 5]

Druhou skupinou slitin ke tváření jsou nevytvrditelné slitiny. Mezi tyto slitiny patří slitiny Al-Mg, které se nevytvrzují, protože i když jsou velmi rychle ochlazeny, dosahují malého stupně přesycení a při stárnutí se jejich pevnost o mnoho nezvýší. Tyto slitiny mají výbornou odolnost proti korozi, zejména v mořské vodě a jsou významným konstrukčním materiálem v automobilovém průmyslu, ve strojírenství a chemickém průmyslu. Další nevytvrditelnou slitinou je Al-Mn - zvyšuje pevnost, tvárnost i odolnost proti korozi. Tyto slitiny se používají jako náhrada za čistý hliník tam, kde jsou požadavky vyšší pevnosti i dobré chemické odolnosti. [1, 5]

Tab. 2.1 Vytvrditelné a nevytvrditelné slitiny [1]

Slitina	Označení série	Poznámka
Al > 99%	1000	nevytvrditelné
Al-Cu; Al-Cu-Mg	2000	vytvrditelné
Al-Mn	3000	nevytvrditelné
Al-Si	4000	vytvrditelné
Al-Mg	5000	nevytvrditelné
Al-Mg-Si	6000	vytvrditelné
Al-Zn-Mg; Al-Zn-Mg-Cu	7000	vytvrditelné
Al a jiné prvky	8000	neuvedeno

2.4 Hliníkové slitiny řady 5000 na bázi Al – Mg

Slitiny Al-Mg tvoří řadu AlMg₂, AlMg₃, AlMg_{4,5}, AlMg₅, AlMg₆. Slitiny s obsahem hořčíku větším než 6 % hm mají sklon ke korozi na hranicích zrn, zejména při mechanickém zatížení, proto se obvykle nepoužívají. [1, 3, 5]

Obvyklý obsah Mg - 2 - 2,5 % (max. 7 % Mg). Hořčík významně zlepšuje mechanické vlastnosti hliníku. Ve slitinách s obsahem 5 - 6% mohou vznikat eutektické složky, které způsobují hrubnutí zrna. Slitiny Al – Mg patří mezi tepelně nevytvrditelné slitiny. [1, 5]

Hořčík výrazně zlepšuje mechanické vlastnosti hliníkových slitin. Pevnost hliníkových slitin výrazně stoupá, zatímco tažnost zpočátku klesá, avšak mírně se začne zvyšovat od 3% hm. Jsou pevné, plastické, dobře obrobitelné, svařitelné a hlubokotažné. Hořčíku ve slitinách pro tváření nebývá více než 7 %, a to z důvodu, že vyšší obsah Mg snižuje odolnost proti korozi. Příčinou sklonu ke korozi je sloučenina Al₃Mg₂, která vzniká na hranicích zrn. Hořčíkové slitiny se dají zpevnit i tvářením za studena. [1, 5, 13]

Hořčík přispívá ke zpevnění tuhého roztoku, v menší míře precipitace intermetalické sloučeniny beta fáze Mg₂Al₃. U slitin zpevněných deformací za studena dochází eventuálně k vyloučení beta fáze za zvýšené nebo i normální teploty po hranicích zrn. To má za následek

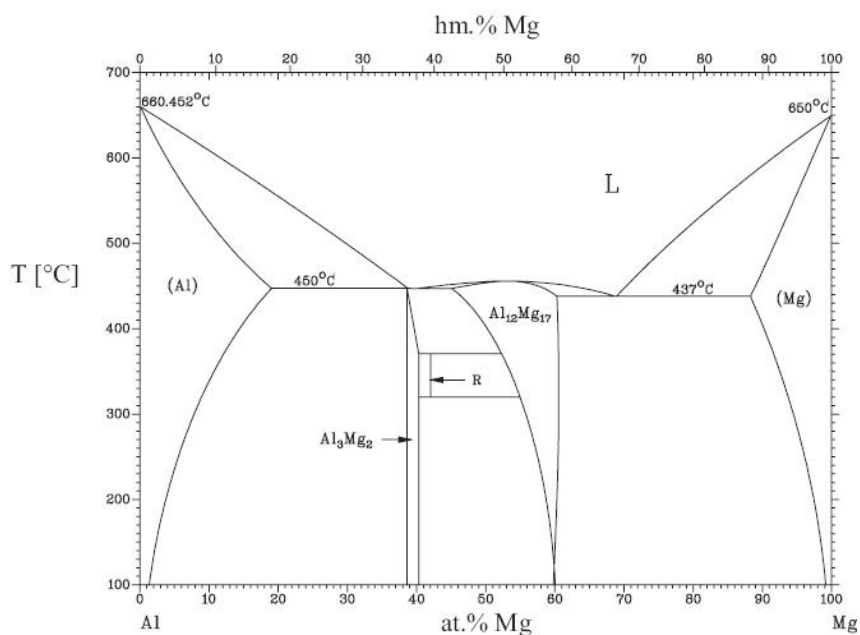
pokles plastických vlastností, pokles korozní odolnosti (intergranulární koroze). Proto se provádí stabilizační žíhání (stav H3X) při rozsahu teplot 130 – 160 °C. [1]

Nevelkou pevnost slitin Al-Mg (v žíhaném stavu $R_m = 140$ až 200 MPa) lze zvýšit deformačním zpevněním, tedy tvářením za studena (do R_m max. 420 MPa), které se používá především pro slitinu AlMg5 a to se stupněm deformace 20 až 30%. Slitiny Al-Mn se tepelně nevytvrzují, neboť nevelké přesycení tuhého roztoku α umožňuje pouze nepodstatně zvýšení pevnosti. Tyto slitiny se používají jako pevnější náhrada čistého hliníku. [1, 5, 13]

Zlepšení chemických a mechanických vlastností jednotlivých slitin dosahujeme přidáním legujících prvků, vyjmenujeme si pouze některé, které jsou používány k legování slitin řady 5000. Častým legujícím prvkem u slitin 5000 je mangan, který zvyšuje pevnostní vlastnosti, zjemňuje zrna a zvyšuje teploty rekystalizace. Dále můžeme legovat chromem, pokud chceme dosáhnout snížení náchylnosti růstu zrn. Při legování antimonem můžeme dosáhnout u slitin 5000 snižování vzniku trhlin za tepla. Měď se používá pro zvýšení pevnostních vlastností, avšak zároveň snižuje korozní odolnost. [1, 5, 13]

Binární diagram hliník – hořčík

Binární diagram hliník – hořčík je znázorněn na Obr. 2.8. Z binárního diagramu je patrné, že hořčík má velkou rozpustnost v hliníku v tuhém stavu a nelze je tedy vytvrzovat. Tyto slitiny při pokojové teplotě mají heterogenní strukturu, která se skládá ze zrn tuhého roztoku alfa a vyloučené fáze beta ($Mg_5 Al_8$). Pokud je přítomen ještě mangan, železo a křemík, tvoří se mimo jiné další různé fáze $MnAl_6$, $AlFeSiMn$ apod. Hořčík se v hliníku rozpouští při 450 °C od koncentrace 17,5 hm% do 1,9 hm% při 200 °C. To způsobuje vyloučení beta fáze ve formě slitiny Al_3Mg_2 . Fáze beta má složitou KPC strukturu. Při 38,6 % - 40,4 at% obsahu Mg je fáze beta stabilní. Při nízkých teplotách se fáze beta martenziticky transformuje na jinou fázi. Tuhý roztok alfa je hliník s KPC strukturou, kdy největší rozpustnost hořčíku 18,9% je při 450 °C. V tuhém roztoku Mg je při eutektické teplotě 437 °C maximálně rozpustný Al 11,8 at%. [1, 4, 5, 13]



Obr. 2.8 Binární diagram hliník – hořčík [4]

2.4.1 Slitina EN AW 5083

Tato slitina je přirozeně tvrdá, nevytvrditelná, dá se velmi dobře svářet, je odolná proti mořské vodě, dobře obrobitelná a lešitelná. Proto je velmi žádaná v lodním průmyslu, pro automobilový průmysl (deformační zóny aut, konstrukce nákladních aut, násypky na auta pro převoz sypkých hmot), nosné konstrukce strojů, výrobu lisařských forem a konstrukční materiály pro letecký průmysl. Mechanické hodnoty materiálu dle technické normy ČSN EN 485-2 jsou uvedeny v Tab. 2.2, chemické složení slitiny udává norma ČSN EN 573-3 viz Tab. 2.3. [11, 14]

Tab. 2.2 Mechanické hodnoty slitiny EN AW 5083[14]

Stav materiálu	Pevnost v tahu R_m		Mez kluzu $R_{p0,2}$		Tažnost - min.	Tvrдость - HBW
	(MPa)		(MPa)		(%)	(-)
	min.	max.	min.	max.		
O/H111	275	350	125	-	15	75

Tab. 2.3 Chemické složení slitiny EN AW 5083[11]

EN AW 5083	Cr (%)	Cu (%)	Fe (%)	Mg (%)	Mn (%)
	0,05 - 0,25	0,1	0,4	4,0 - 4,9	0,4 - 1,0
	Ni (%)	Si (%)	Ti (%)	V (%)	Zn (%)
	-	0,4	0,15	-	0,25

2.5 Uzdravovací procesy

Uzdravovací procesy materiálu jsou procesy, které vedou k odpevnění, nebo-li změkčení materiálu. Tyto procesy dělíme na dynamické a postdynamické. Dynamické procesy probíhají během vlastní deformace materiálu, zatímco postdynamický uzdravovací proces je spojený s tvářením za vysokých teplot, kdy uzdravování probíhá po ukončení celého cyklu tváření materiálu, během ochlazování, ale také v pauze po jednotlivém úběru, a to dynamickým zotavením materiálu, nebo dynamickou rekrystalizací. Mezi hlavní projevy těchto procesů patří snižování hustoty dislokací. Statické uzdravovací procesy probíhají při následném žíhacím režimu v peci. [2, 8, 12]

2.5.1 Dynamické zotavení

Zotavení jsou změny v deformovaném materiálu, které se stanou, než dojde k rekrystalizaci materiálu. Tento proces se vyznačuje přemísťováním a částečnou anihilací dislokací, tím klesá vnitřní energie materiálu. V protažených zrnech vznikají rovnoosá subzrna. Tento proces se nazývá polygonace. Výskyt dynamického zotavení je hlavně u kovů s vysokou energií vrstevných chyb (např. hliník). Dochází zde k příčnému kluzu a šplhání dislokací, a to jak hranových, tak šroubových dislokací. Při dynamickém zotavení hranice zrn nemigrují, nevznikají nová zrna a zůstávají tak v texturním uspořádání. Při tomto procesu nenastává dokonalé uzdravení materiálu. [12]

Dynamické zotavení je podporováno vyšším obsahem vakancí, vyšší teplotou tváření a vysokou energií vrstevných chyb. [2, 12]

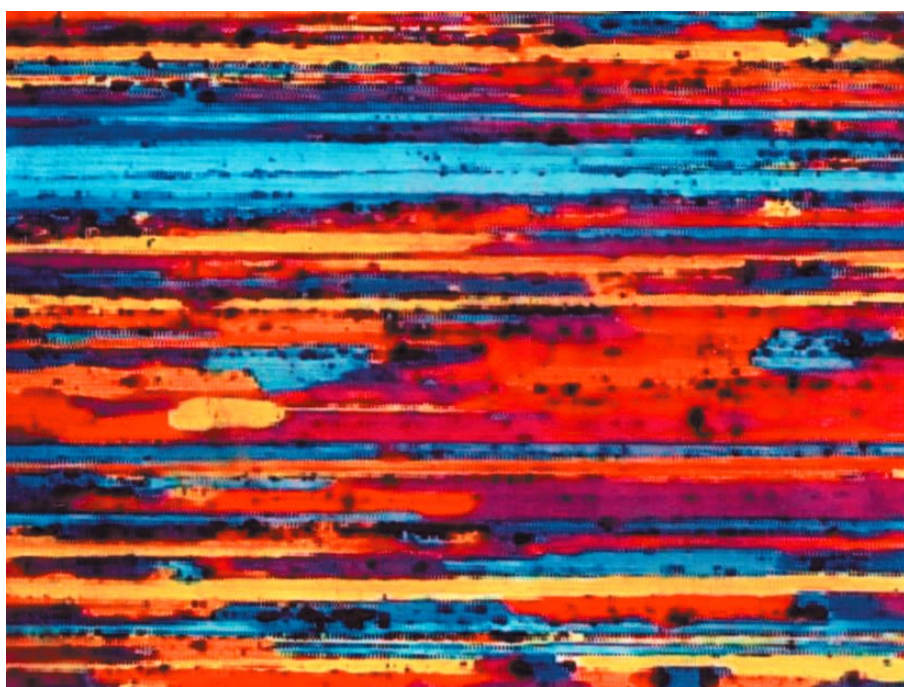
2.5.2 Dynamická rekrystalizace

Aby došlo k dynamické rekrystalizaci, je nutné vyvolat větší deformaci než u statické rekrystalizace. Při tomto procesu vznikají nová zrna. Během tohoto procesu se zvyšují plastické vlastnosti materiálu, ale nezůstane zachováno zpevnění. [6]

Pro průběh dynamické rekrystalizace musí být splněny určité podmínky. Jsou to vysoká teplota, velikost deformace nad kritickou deformací a nízká energie vrstevné chyby. Dynamická rekrystalizace je urychlována vyšší rychlostí deformace, vyšším stupněm čistoty slitiny, menší velikostí výchozího zrna, vyšší teplotou. [2, 6]

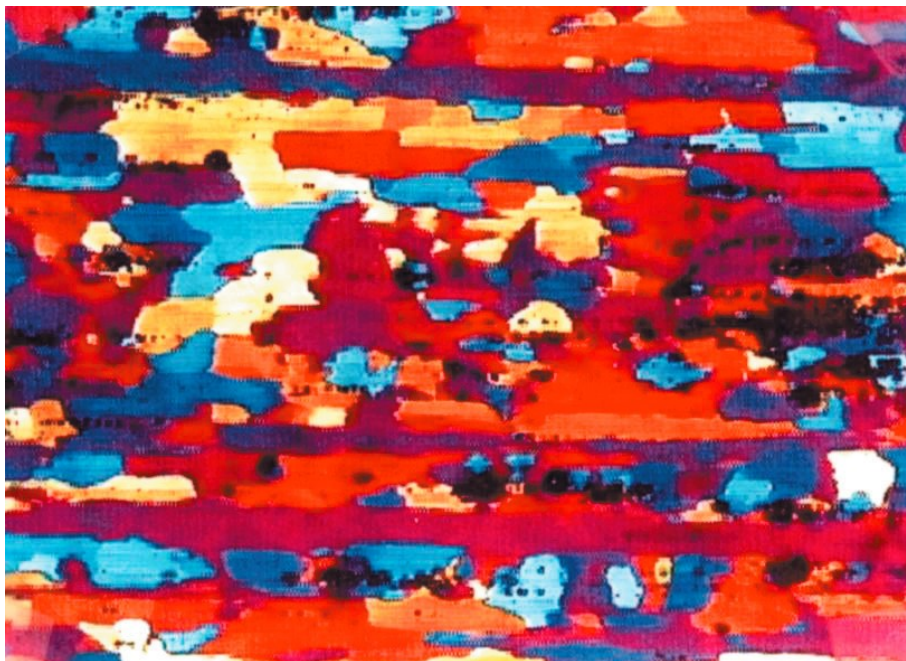
Při rekrytalizaci se může stát, že proces uzdravení neproběhne až do konce a materiál je pak tvořen jak rekrytalizovanými zrny, tak deformovanou strukturou, která není rekrytalizována. Tyto částečně rekrytalizované stavy dělíme do dvou skupin. Dělí se dle objemu dosažené rekrytalizace na částečně rekrytalizovanou strukturu a částečně nerekrystalizovanou strukturu. [1, 2, 6]

U částečně rekrytalizované struktury je výskyt rekrytalizovaného zrna menší než 50 %, viz *Obr. 2.9*. [1]



Obr. 2.9 Částečně rekrytalizovaná struktura, ve vláknité oblasti jsou ojediněle vzniklá nová zrna [1]

V druhém případě u částečně nerekrystalizovaného struktury je podíl nově vzniklého zrna vyšší než 50 % z celkového objemu, tuto strukturu znázorňuje *Obr. 2.10.* [1]



Obr. 2.10 Částečně nerekrystalizovaná struktura, v rekrystalizované struktuře ojedinělý výskyt míst s nerekrystalizovanou strukturou [1]

2.5.3 Postdynamické uzdravování

Stejně jako při dynamickém zotavení, dochází i u statického zotavení pouze k částečnému změkčení materiálu a u statické rekrystalizace dochází již k plnému uzdravení deformované struktury. Tato rekrystalizovaná struktura je pak základem pro vznik nových zrn. Na rozdíl od statické rekrystalizace nemá metadynamická rekrystalizace inkubační dobu. Díky této skutečnosti je její průběh o jeden řád rychlejší a tím předbíhá statickou rekrystalizaci. [1, 2, 6]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Analýza mikrostruktury slitiny EN AW 5083 po plastometrické simulaci válcování za tepla metodou světelné mikroskopie

3.1 Cíl práce

Cílem práce bylo zkoumat a zdokumentovat průběh uzdravovacích procesů u slitiny ENAW 5083, při deseti průchodech během válcování bramy a ověřit typ probíhajících postdynamických uzdravovacích procesů probíhajících při velkých deformacích.

3.2 Vlastní experiment

Zkoumáno bylo deformační chování a uzdravovací procesy hliníkové slitiny o chemickém složení, které je uvedeno v níže uvedené *Tab. 3.1*.

Tab. 3.1 Chemické složení vzorků

EN AW 5083	Cr (%)	Cu (%)	Fe (%)	Mg (%)	Mn (%)
	0,098	0,0162	0,294	4,2509	0,4794
Tavba 6523	Ni (%)	Si (%)	Ti (%)	V (%)	Zn (%)
	0,0053	0,1004	0,0357	0,015	0,018

Byly použity vzorky 10 x 15 mm, dále byla provedena simulace prvních 10 průchodů při válcování bramy přerušovanou zkouškou jednoosým tlakem. Výchozí stav byl po odlévání do klasické kokily. Pro jednoduchost byly simulace na modulu Hydrawedge II prováděny izotermicky. Tvářecí teploty byly tři, a to 440 °C, 470 °C a 500 °C. Další parametry simulací jsou uvedeny v *Tab. 3.2*. Deformační rychlost byla z důvodu porovnatelnosti pro všechny úběry jednotná – 3 s⁻¹.

Tab. 3.2 Relativní výškové úběry a časové prodlevy mezi jednotlivými průchody

Číslo průchodu	Výškový úběr [%]	Meziúběrová pauza [s]
1	6.3	
2	7.0	8
3	7.4	8
4	8.1	13
5	8.6	8
6	9.0	29
7	11.0	10
8	11.4	11
9	13.6	13
10	15.3	11

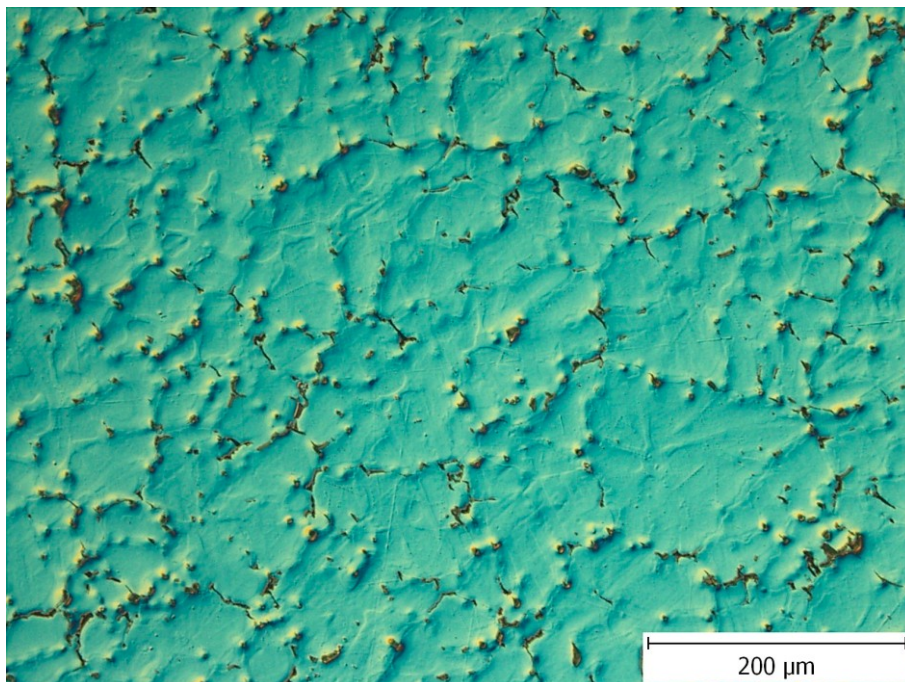
Za účelem studia postdynamického uzdravování byla provedena fixace struktury vzorků kalením těsně před 6. úběrem, resp. před 8. úběrem. Během meziúběrové pauzy tak měl materiál prostor pro postdynamické uzdravování podobu 29 s, resp. 11 s (viz Tab. 3.2) po předchozím úběru. Mikrostruktura v nejméně protvářených částech vzorků (odpovídající téměř výchozímu stavu) je dokumentována snímky na Obr. 3.9. Nápadný je reliéf některých zrn Obr. 3.10.

Nejdříve byla porovnána výchozí struktura v litém stavu z klasické kokily a struktura po režimech homogenizačního žhání 440 °C, 470 °C a 500 °C. Homogenizační žhání mělo následující parametry: 6 hodin náběh, 6 hodin výdrž, 8 hodin bez ohřevu v uzavřené peci, 5 hodin náběh na válcovací teplotu 440 °C, 470 °C nebo 500 °C.

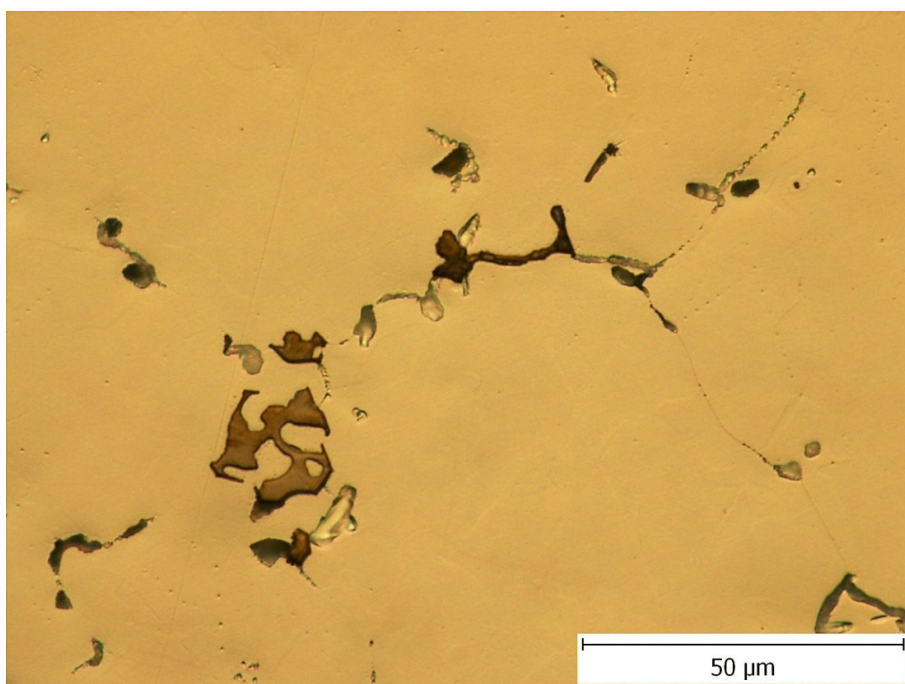
Litá struktura z klasické kokily je zobrazena leptáním - viz Obr. 3.1. Vzorky na metalografické výbrusy byly nejdříve nařezány na velikost o 2 cm x 2 cm x 5 cm a označeny. Poté se jednotlivé vzorky podrobily broušení povrchu brusnými papíry o hrubosti 320, 500, 800, 1000. U brusného papíru o hrubosti 1000 byla navíc aplikována diamantová pasta „Urdiamant“ D3 (velikost zrna 3 μm) a následně křemičitou suspenzi (velikost zrna 0,7 μm). Dalším krokem bylo leštění leštícími plátny. Leštění jedním typem leštícího plátna probíhalo pod tlakem 50 N a 2,5 min. Postupně byla použita plátna typu MOL, LAB a CHEM. Takto připravené vzorky byly leptány HBF₄ na zobrazení zrna (výdrž 1 minutu) nebo HF (výdrž 1 minutu) na zobrazení struktury. Nakonec byl proveden oplach vodou, poté lihem a vysušení.

Na hranicích zrn jsou identifikovatelné vměstky, světlé útvary jsou charakteristické vysokým obsahem železa, středně zvýšeným obsahem manganu, kyslíku a občas i mírně

zvýšeným obsahem chromu. Jedná se tedy o komplexní oxidy. Ve struktuře nelze vyloučit přítomnost intermetalických fází, viz *Obr. 3.2*.



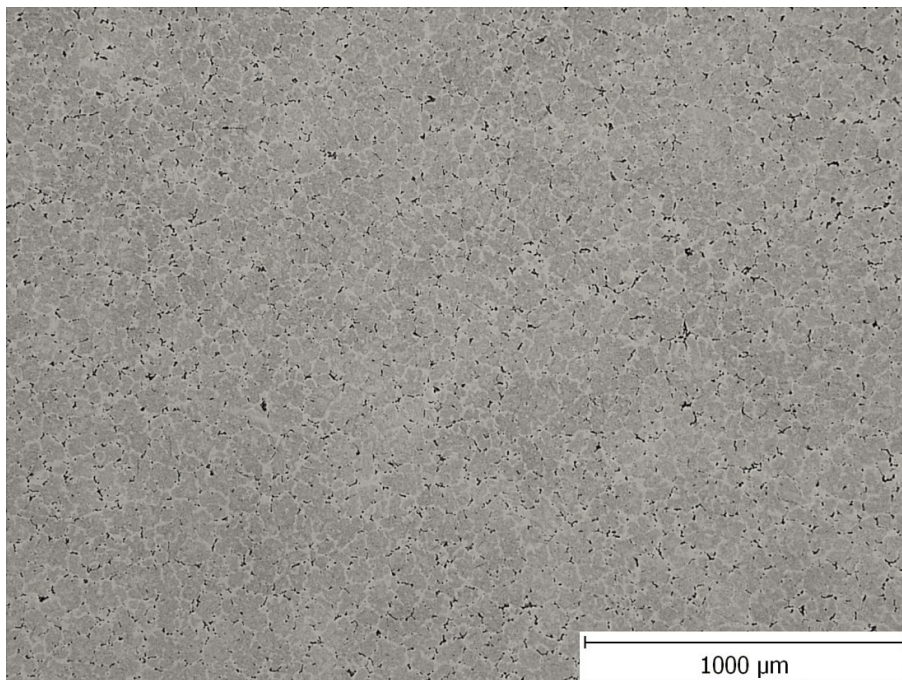
Obr. 3.1 Zrno lité struktury zviditelněné leptáním



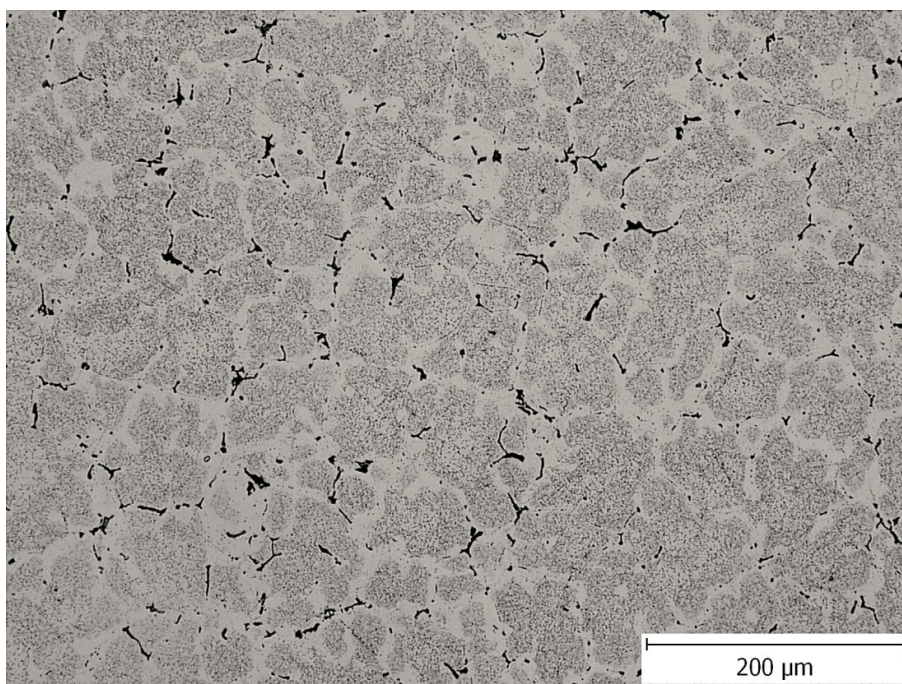
Obr. 3.2 Vměšky na hranicích zrn (neleptáno) 50 μm

Na následujících obrázcích můžeme pozorovat mikrostrukturu materiálu z klasické kokily, který je po homogenizaci při 500 °C - *Obr. 3.5* a po homogenizaci při 470 °C - *Obr.*

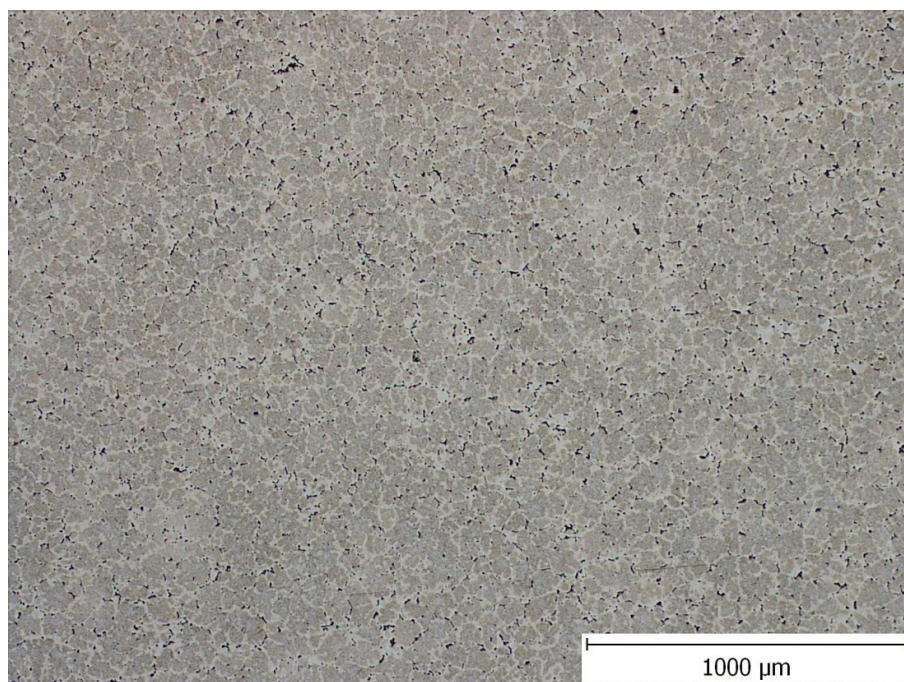
3.3. V detailu je pak struktura na *Obr. 3.4* a *Obr. 3.6*. Rozdílná teplota homogenizace se neprojevila výraznější změnou mikrostruktury.



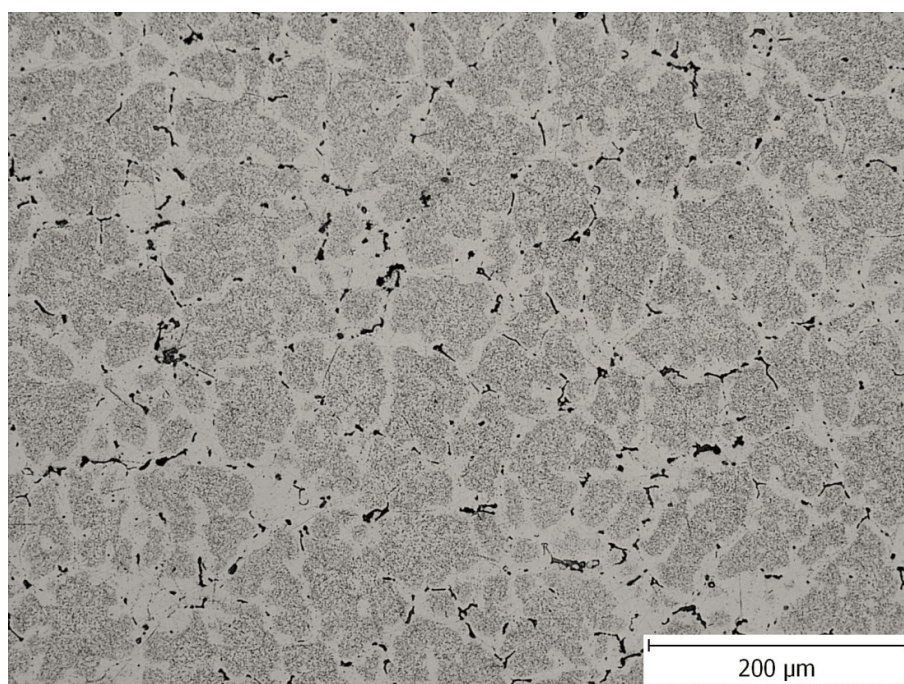
Obr. 3.3 Homogenizace při 470 °C



Obr. 3.4 Homogenizace detail při 470 °C

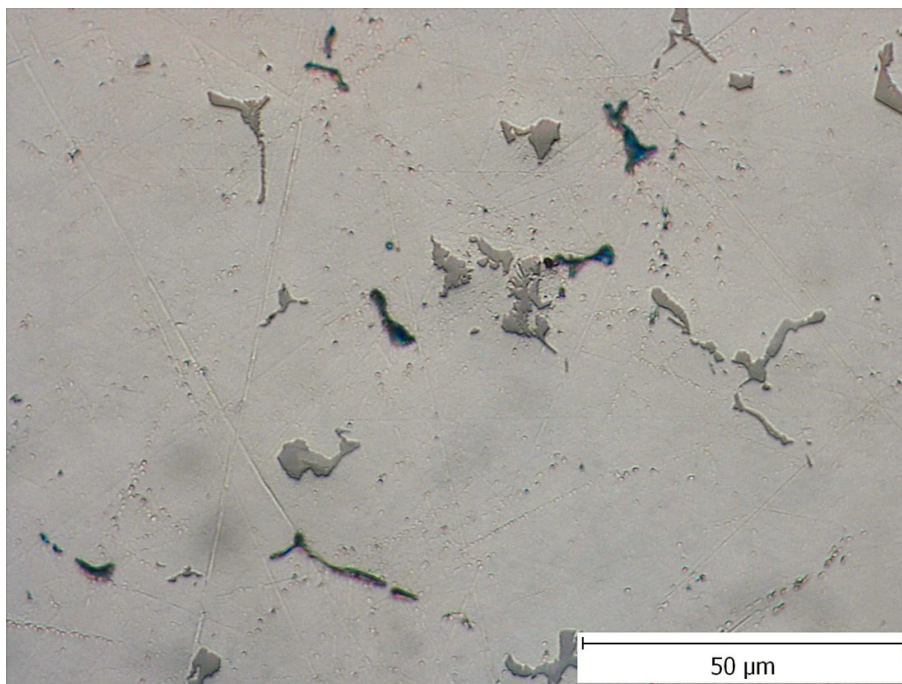


Obr. 3.5 Homogenizace při 500 °C

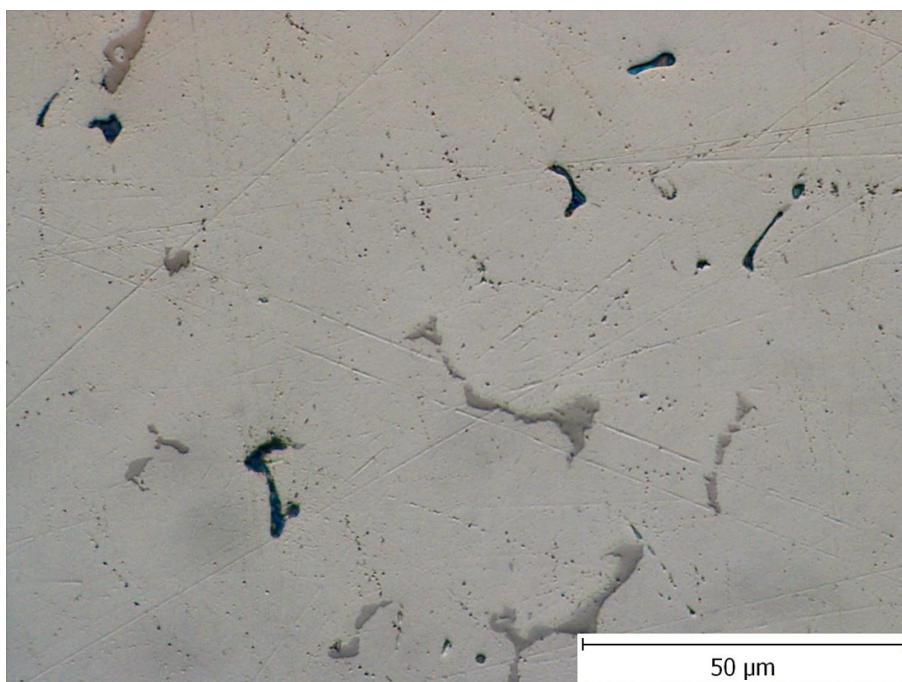


Obr. 3.6 Homogenizace detail při 500 °C

Homogenizovaný materiál z klasické kokily nevykazuje významné hrubnutí zrna - *Obr. 3.5*, ani redistribuci vměstků - *Obr. 3.7* a *Obr. 3.8*.

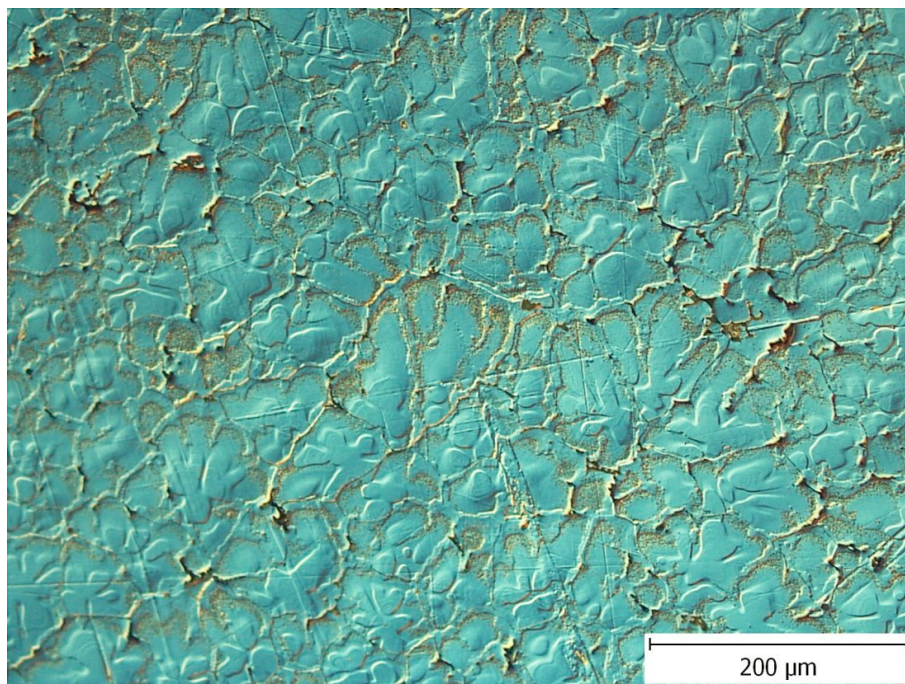


Obr. 3.7 Zobrazení struktury fází po homogenizaci na 470°C

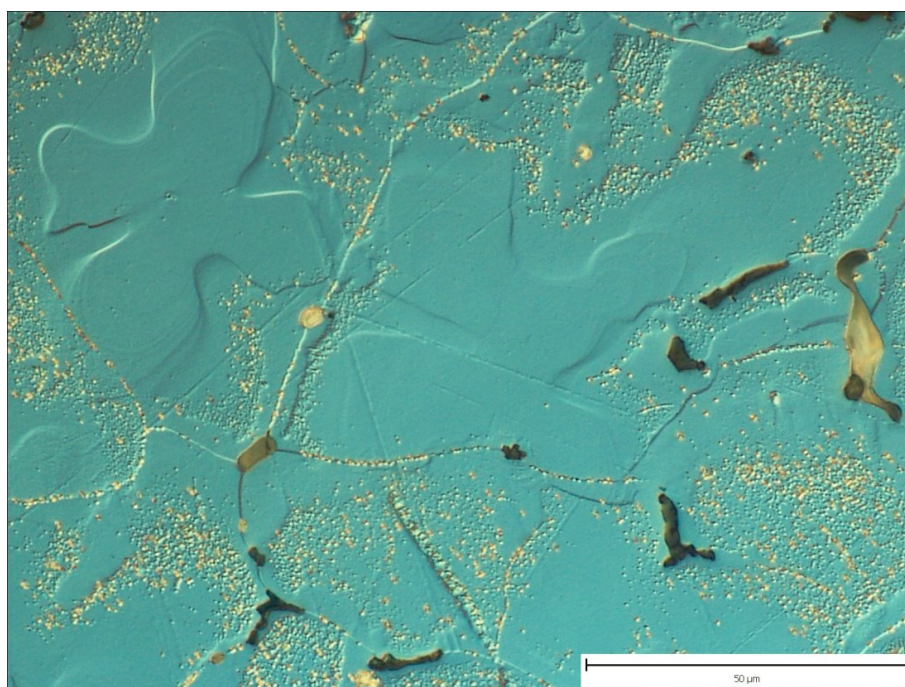


Obr. 3.8 Zobrazení fází po homogenizaci na 500 °C

Byl zpozorován vliv homogenizace na mikrostrukturu materiálu, který se projevil vývinem světlejších partií na hranicích zrn a vznikem tmavších bodů uvnitř zrn. Lze tedy říci, že určitě dochází k difuzním procesům, čímž dochází k redistribuci některých chemických prvků a asi i vzniku nových fází uvnitř zrn. Detailnější analýza provedena nebyla.

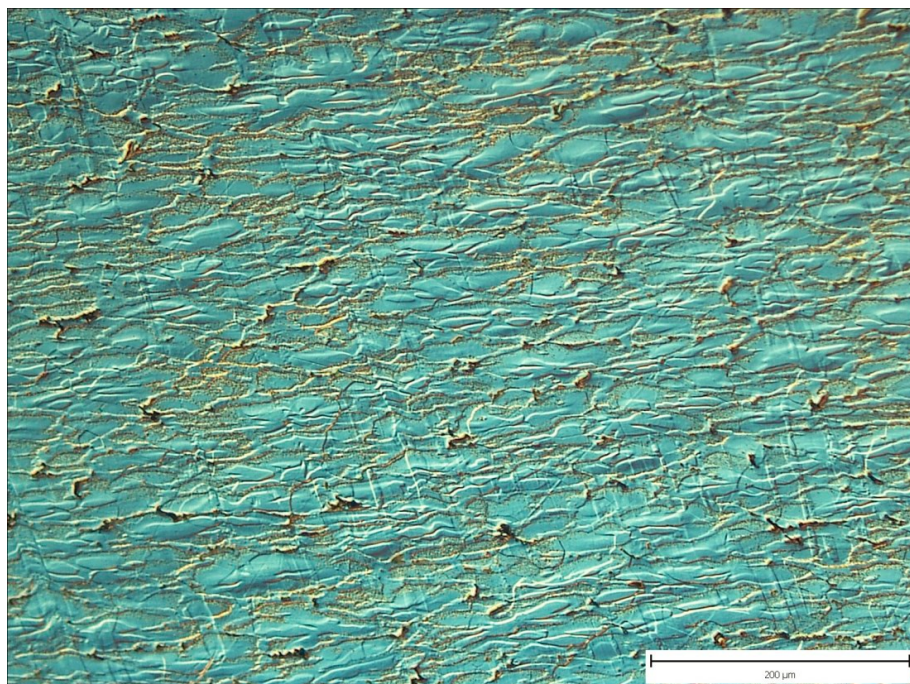


Obr. 3.9 Celkový pohled na povrch po tváření

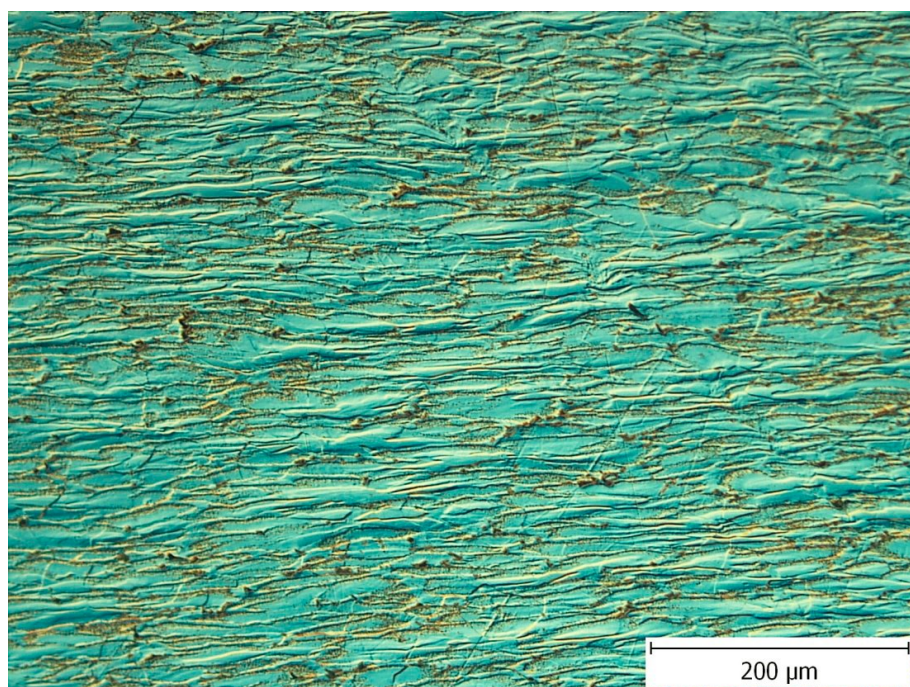


Obr. 3.10 Zrno v minimálně protvářené oblasti (teplota tváření 500 °C)

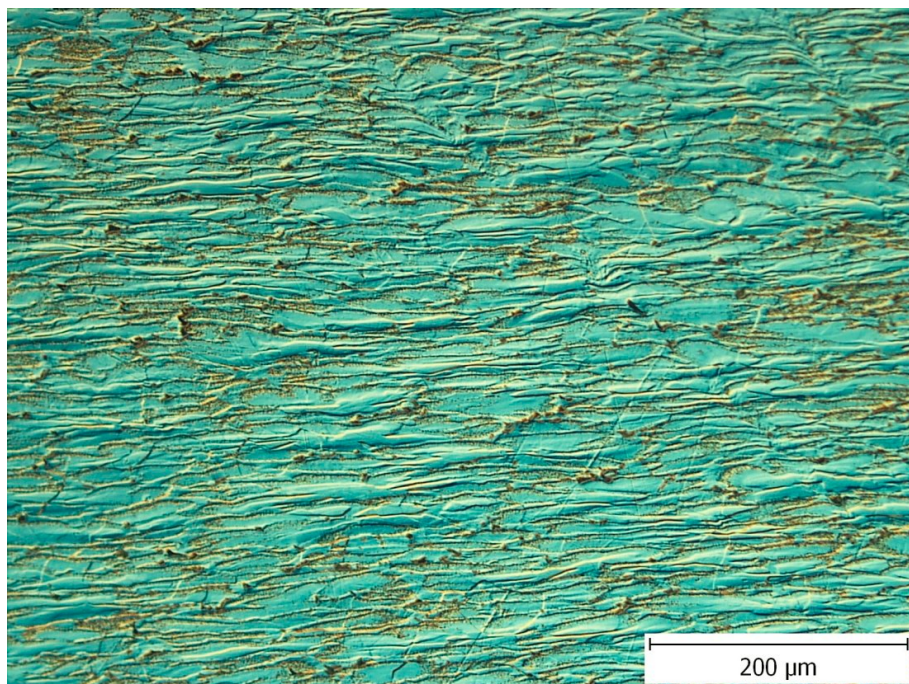
Na *Obr. 3.11* a *Obr. 3.12* je zachycena mikrostruktura ve středové oblasti při 500 °C mezi 6. až 8. úběrem. Další mikrostrukturou znázorněnou na *Obr. 3.13* a *Obr. 3.14* je mikrostruktura materiálu ve středové oblasti, opět mezi 6. a 8. úběrem avšak při teplotě 470 °C.



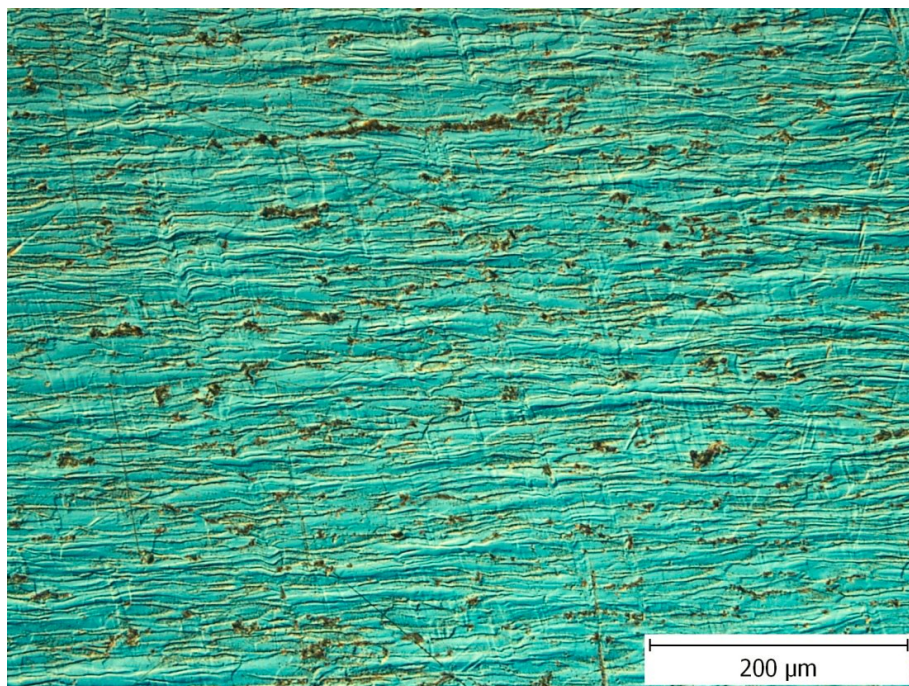
Obr. 3.11 Mikrostruktura středové oblasti těsně před 6. úběrem při 500 °C



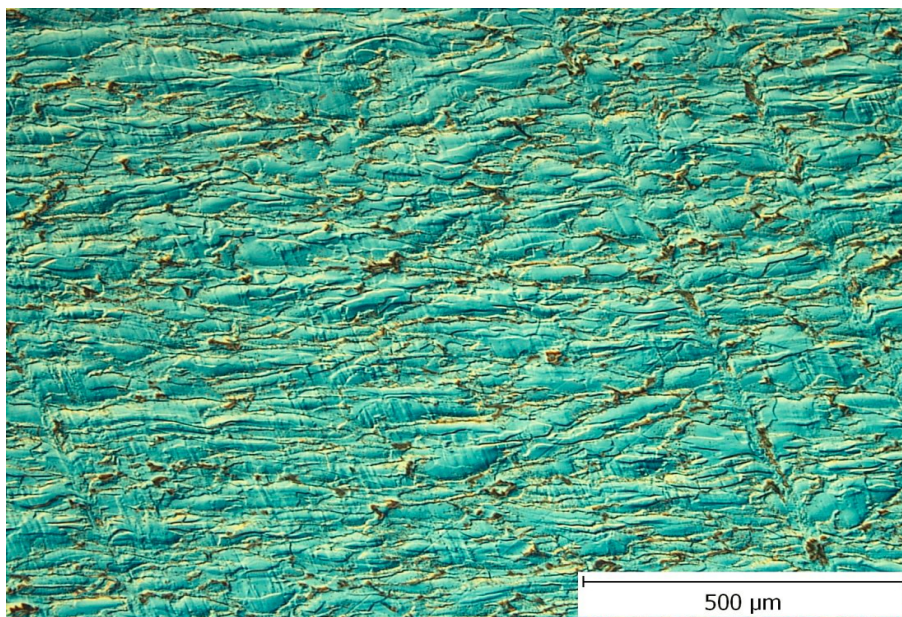
Obr. 3.12 Mikrostruktura středové oblasti před 8. úběrem při 500 °C



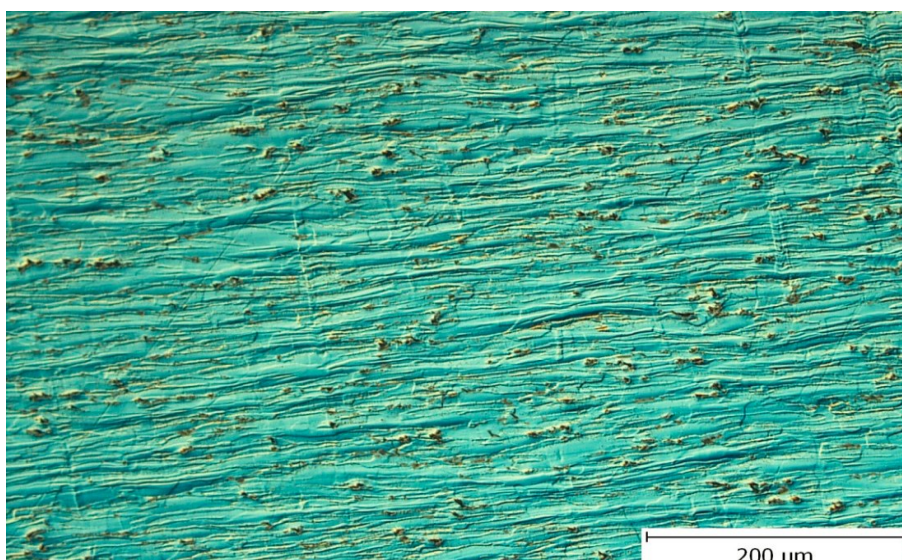
Obr. 3.13 Mikrostruktura středové oblasti těsně před 6. úběrem při 470 °C



Obr. 3.14 Mikrostruktura středové oblasti před 8. úběrem při 470 °C

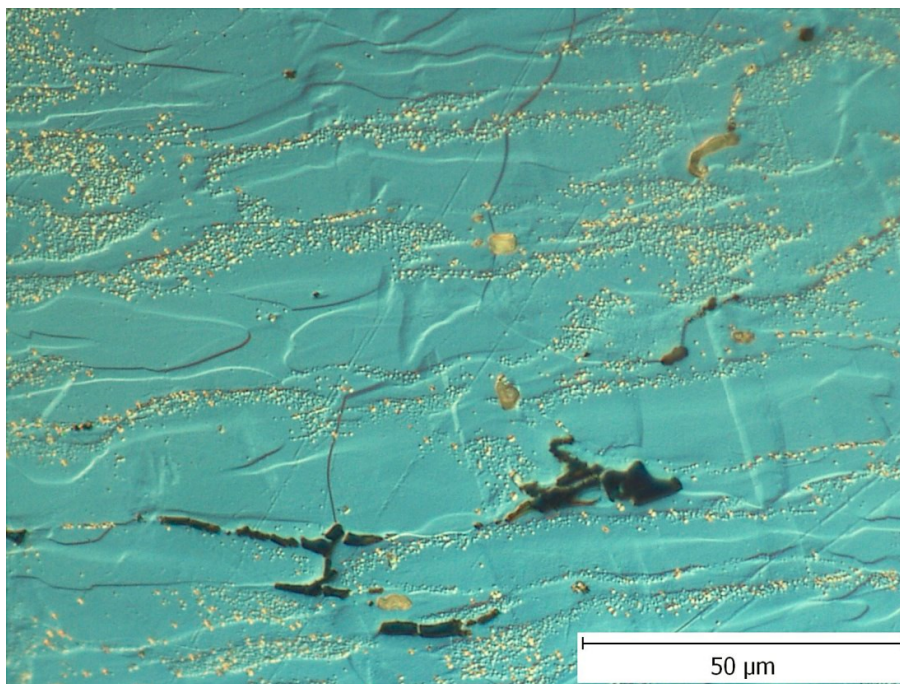


Obr. 3.15 Mikrostruktura středové oblasti před 6. úběrem při 440 °C

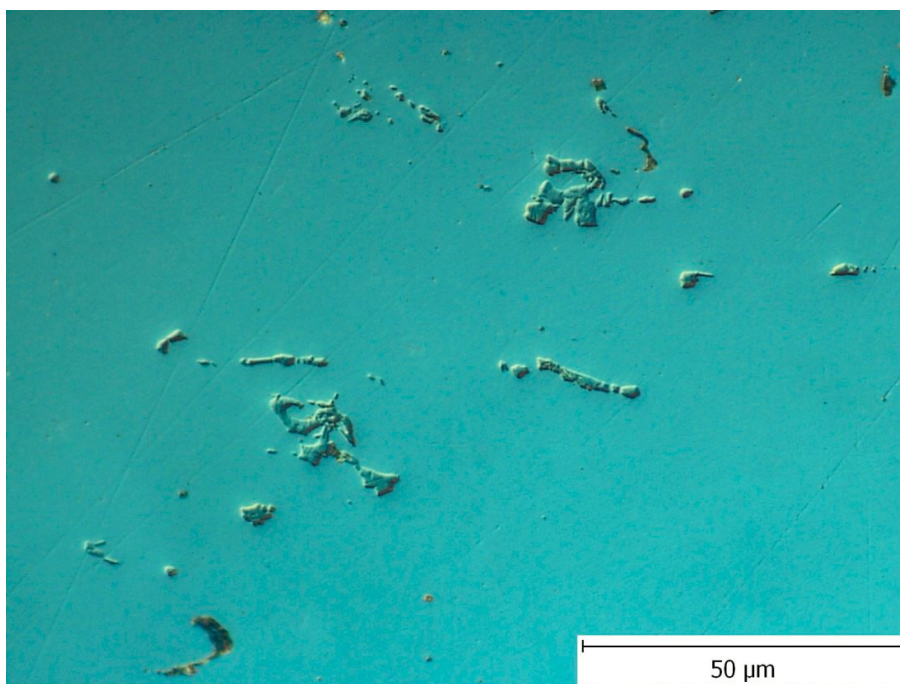


Obr. 3.16 Mikrostruktura ve středové oblasti před 8. úběrem při 440 °C

Lze konstatovat, že ani dlouhá časová prodleva mezi 5. a 6. úběrem nevykazuje za všech teplot žádný náznak průběhu statické rekrytalizace. Ani při teplotě 500°C, při níž došlo relativně k největšímu zjemnění zrna, je struktura prakticky nerekrystalizována. Je zřejmé, že přetrvává větší část původních protažených zrn, nemají dokonale rovnoosý charakter, ale jsou zploštělá – viz *Obr. 3.17*.



Obr. 3.17 Tvar zrn ve středové oblasti před 6. úběrem při 500 °C



Obr. 3.18 Vměstky středové oblasti při 500 °C před 6. úběrem

Meziúběrová pauza před 8. průchodem se u všech aplikovaných teplot ukázala jako velmi krátká pro dostatečný průběh statické rekystalizace. Struktura je vždy vláknitá, mezi majoritními protaženými zrny lze jen výjimečně nalézt náznaky počátečních fází rekystalizace. Struktury na *Obr. 3.11* až *Obr. 3.16* lze označit jako deformované, prakticky nerekrystalizované.

4. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla věnována problematice uzdravovacích procesů u hliníkové slitiny EN AW 5083. Metalografickou analýzou byla znázorněna zrna ve středové oblasti mezi 5-7. úběrem při třech tvářecích teplotách 440 °C, 470 °C a 500 °C.

Rozdílné tvářecí teploty nevedly k výraznější změně struktury materiálu. Materiál nevykazoval významné zhrubnutí zrna, ani redistribuci vměstků. Při homogenizaci byl zaznamenán výskyt světlejších partií na hranicích zrn a vznik tmavších bodů uvnitř zrn, na základě tohoto faktu lze konstatovat, že dochází k difuzním procesům, i když tento proces nebyl v rámci této práce dále analyzován. Při tvářecí teplotě 500 °C došlo k relativně největšímu zjemnění zrna, ale proces rekrystalizace zde neproběhl.

Známka rekrystalizace nebyla pozorována ani mezi 5. a 6. úběrem, kdy zadaná technologie válcování přináší větší časovou prodlevu mezi jednotlivými úběry. Zrna jsou sice oblejšího tvaru, ale tato skutečnost byla pravděpodobně způsobena pouze menším úběrem při tváření, nikoliv uzdravovacími procesy. Vlákniatá struktura je dobře viditelná ve středové oblasti před 8. úběrem, kde zrna jsou také značně zploštělá a protažená.

Z provedené metalografické analýzy vyplývá, že u žádného ze studovaných stavů, ani po 5. průchodu, ani po 7. průchodu, ani vlivem teploty tváření, nebyl prokázán průběh rekrystalizace. Metalografické vzorky lze označit jako nerekrystalizované, deformované a s vláknitou strukturou. Materiál se během víceúběrového válcování pouze zpevňoval. Proces zotavení tímto nelze vyloučit, jelikož se mohl projevit změnou tvrdosti materiálu, ta však v této práci nebyla hodnocena.

SEZNAM LITERATURY

- [1] MICHNA Štefan et al., *Encyklopedie hliníku*, Prešov: Adin, s.r.o., 2005, 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] CALLISTER, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 7. Vyd. New York: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 0-471-73696-1.
- [3] MICHNA Štefan, *Technologie a zpracování hliníkových materiálů*, 2. Vydání, Praha: Print point s.r.o. 2015, 150 s., ISBN 978-80-260-7706-0
- [4] MICHNA Š, MICHNOVÁ L, *Neželezné kovy*, 1. vydání, Praha Print Point s.r.o., 2014, 245 s., ISBN 978-80-260-7132-7
- [5] MALCEV M. V. et al. *Metalografia neželezných kovov*, 1. vydání, TISK knižní výroba, n. p. závod Brno, 1963, 366 s.
- [6] PLUHAŘ Jiří a kolektiv, *Nauka o materiálech I*, 1. Vydání, Nakladatelství technické literatury Praha společně s Alfa vydavatelstvím Bratislava, 1989, 552 s.
- [7] SCHINDLER Ivo et al., *Optimalizace plasticity výše legované slitiny AlMg4,5Mn0,7*; Závěrečná zpráva ke smlouvě o dílo HS 6061501, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2015, 20 s.
- [8] FABÍK, R. *Tváření kovů: učební text*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2572-4.
- [9] SCHINDLER, I., KAWULOK, P. *Deformační chování materiálů: studijní opora*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2013. 94 str. ISBN 978-80-248-3361-3.
- [10] ČSN EN 573-1 *Česká technická norma-chemické složení a druhy tvářených výrobků, část 1: číselné označování*. Praha: Český normalizační institut 2005, 9 s.
- [11] ČSN EN 573-3 *Česká technická norma-chemické složení a druhy tvářených výrobků, část 3: chemické složení a druhy výrobků* Praha: Český normalizační institut 2014, 34 s.

- [12] VAN LANCKER Marc, *Metallurgy of Aluminium alloys*, first published, Williams Clowes and Sons, 1967, 488s.
- [13] ALTENPOHL, *Aluminium und Aluminiumlegierungen*, Berlin: Springer – Verlag Berlin, 1965, 898s.
- [14] ČSN EN 485-2 *Česká technická norma- Hliník a slitiny hliníku, plechy, pásy a desky, část 2: mechanické vlastnosti* Praha: Český normalizační institut 2014, 84 s.

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2.1 Vytvrditelné a nevytvrditelné slitiny [1]</i>	18
<i>Tab. 2.2 Mechanické hodnoty slitiny EN AW 5083[14]</i>	20
<i>Tab. 2.3 Chemické složení slitiny EN AW 5083[11]</i>	20
<i>Tab. 3.1 Chemické složení vzorků</i>	24
<i>Tab. 3.2 Relativní výškové úběry a časové prodlevy mezi jednotlivými průchody</i>	25

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1 Zrno rovnoosé nebo globulitické, poměr na sebe kolmých směrů 1:1 [1].....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2.2 Rovnoosé, globulitické zrno u slitiny AlMg5 - zvětšeno 100x [1]</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2.3 Zrno nerovnoosé, mírně protáhlé, poměr na sebe kolmých směrů 2.1 [1]</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2.4 Nerovnoosé mírně protáhlé zrno u slitiny AlMgSi0,5 - zvětšeno 100x [1]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2.5 Zrno nerovnoosé, silně protáhlé, poměr na sebe kolmých směrů 4:1 [1].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2.6 Nerovnoosé mírně protáhlé zrno u slitiny AlZn6MgCu1,5 zvětšeno - 100x [1]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2.7 Schematické rozdělení Al slitin slévarenských a Al slitin pro tváření[1]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2.8 Binární diagram hliník – hořčík [4]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2.9 Částečně rekrystalizovaná struktura, ve vláknité oblasti jsou ojediněle vzniklá nová zrna [1].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2.10 Částečně nerekrystalizovaná struktura, v rekrystalizované struktuře ojedinělý výskyt míst s nerekrystalizovanou strukturou [1]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.1 Zrno lité struktury zviditelněné leptáním</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.2 Vměstky na hranicích zrn (neleptáno) 50 μm.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.3 Homogenizace při 470 °C</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3.4 Homogenizace detail při 470 °C.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3.5 Homogenizace při 500 °C</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3.6 Homogenizace detail při 500 °C.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3.7 Zobrazení struktury fází po homogenizaci na 470°C.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3.8 Zobrazení fází po homogenizaci na 500 °C.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3.9 Celkový pohled na povrch po tváření.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3.10 Zrno v minimálně protvářené oblasti (teplota tváření 500 °C).....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3.11 Mikrostruktura středové oblasti těsně před 6. úběrem při 500 °C</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3.12 Mikrostruktura středové oblasti před 8. úběrem při 500 °C.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3.13 Mikrostruktura středové oblasti těsně před 6. úběrem při 470 °C</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3.14 Mikrostruktura středové oblasti před 8. úběrem při 470 °C.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3.15 Mikrostruktura středové oblasti před 6. úběrem při 440 °C.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 3.16 Mikrostruktura ve středové oblasti před 8. úběrem při 440 °C.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 3.17 Tvar zrn ve středové oblasti před 6. úběrem při 500 °C.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3.18 Vměstky středové oblasti při 500 °C před 6. úběrem.....</i>	<i>34</i>